高出力と狭い固有スペクトル線幅を有するフォトニック結晶レーザーの実現

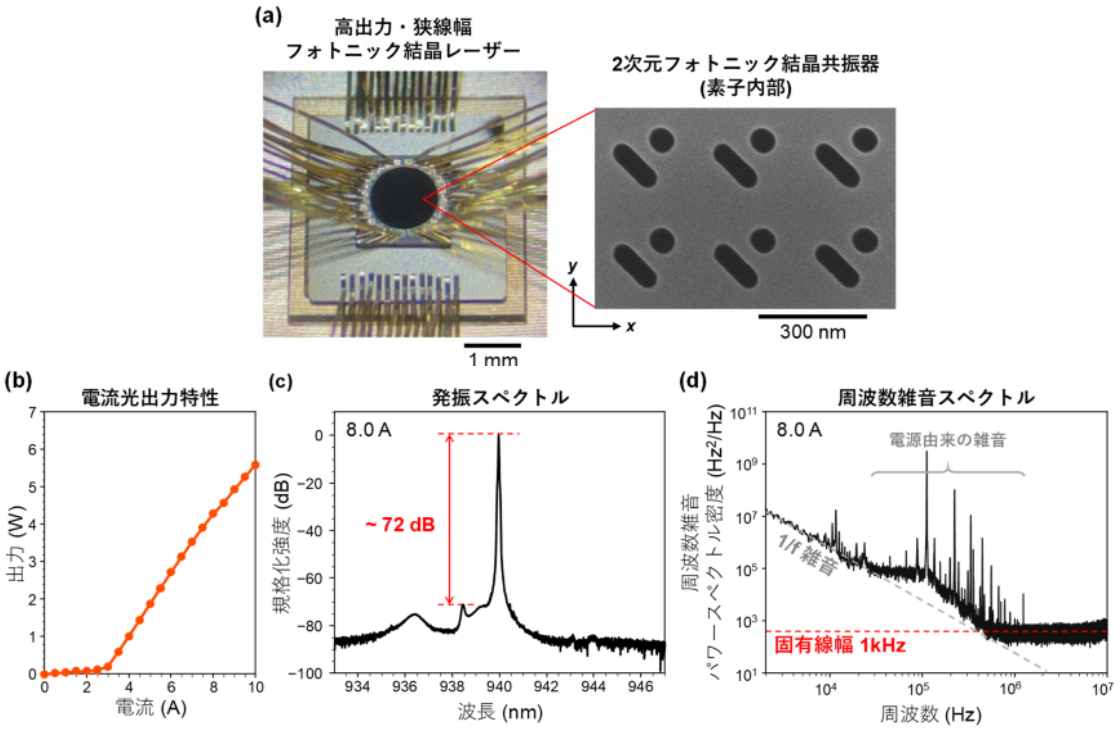
―衛星間通信や衛星搭載ライダー等の各種応用に向けて―

概要

京都大学工学研究科の野田進 教授、森田遼平 同特定研究員、井上卓也 同助教、吉田昌宏 同助教、三菱電機株式会社の榎健太郎研究員らのグループは、フォトニック結晶レーザー（PCSEL）[注 1)]において、これまでの半導体レーザー素子単体では実現が困難であった高い出力と狭い固有スペクトル線幅の両立を実現しました。

スペクトル線幅とは、出力されるレーザー光の周波数（波長）の揺らぎを示す指標です。このスペクトル線幅が狭いほど、レーザー光の「純度」が高くなり、可干渉性（コヒーレンス）が増大し、光の周波数や位相などの光の波としての性質が利用しやすくなります。今回、研究グループは、直径 1mm の PCSEL にて、5 W という高い出力と 1kHz という極めて狭い固有スペクトル線幅の両立を世界で初めて実現しました。この成果は、高出力・狭線幅なレーザー光源を必要とする、自由空間光通信（特に宇宙空間における衛星間通信）や人工衛星からの地表表面の観測（衛星搭載ライダー）などの宇宙応用、さらには、レーザー照射による原子冷却等、様々な分野の発展に PCSEL が貢献可能であることを示しています。

本成果は、2024 年 2 月 26 日（現地時間）に、米国科学誌 *Optica* のオンライン版にて掲載されました。



図：開発した高出力・狭線幅フォトニック結晶レーザーの写真と内部の 2 次元フォトニック結晶共振器の走査電子顕微鏡写真(a)、電流光出力特性(b)、発振スペクトル（c）および 周波数雑音スペクトル(d)。8.0 A の直流電流注入時に、5 W という高出力と 1kHz という狭固有スペクトル線幅を実現しました。

１．背景

レーザー光は、太陽光や発光ダイオード（LED）などとは異なり、特定の周波数（波長）に光エネルギーが集中しています。この周波数の揺らぎ幅をスペクトル線幅と呼びます。スペクトル線幅が狭いほど、レーザー光の「純度」が高くなり、可干渉性（コヒーレンス）が増大し、周波数や位相などの光の波としての性質を効率的に利用できるようになります。コヒーレンスの高いレーザー光は、散乱・吸収などによってパワーが非常に微弱となった場合においても、その周波数や位相の情報を、光の干渉性を利用して読み出すことが可能であるため、衛星間通信や人工衛星からの地球表面観測などの宇宙応用にとって重要と言えます。また、別の応用として、スペクトル純度の高いレーザー光を原子やイオンに照射すると、それらを絶対零度近くまで冷却することが可能であり、原子物理学における様々な物理現象の解明にも役立つといえます。特に、前者の宇宙応用においては、レーザー光源が小型・低消費電力・高出力であることが要求されるため、小型・安価・高効率という特長をもつ半導体レーザー素子単体で、高出力、狭スペクトル線幅動作を実現することは、応用上極めて重要といえます。

半導体レーザー固有の周波数揺らぎは、無秩序に発生する自然放出光[注 2)]が、レーザー光に結合することにより生じます。従って、半導体レーザーの固有スペクトル線幅を狭くするためには、まず、レーザー発振を、単一の周波数（波長）で生じさせつつ、その強度を十分に強くすることが重要です。PCSEL は、従来の半導体レーザーと比較して、大きな発振面積でも単一の周波数で、高出力動作可能であるという特長をもち[注 3,4)]、本質的に狭い固有スペクトル線幅を有していると言えます。研究グループは、極最近、直径 250μm の PCSEL において、70kHz という狭い固有スペクトル線幅を実験的に示すことに成功し、理論的にも、より狭い固有スペクトル線幅が実現可能であることを示しました[注 5)]。併せて、この PCSEL の狭固有スペクトル線幅の特長を活かし、KDDI 株式会社および株式会社 KDDI 総合研究所と共同で、宇宙空間における衛星間通信に向けた高感度な自由空間通信方式への適用可能性の実証にも成功しています[注 6)]。この PCSEL の固有スペクトル線幅をさらに低減するとともに出力を増大させることができれば、より長距離かつ大容量の自由空間通信が期待されるなど、応用の幅が一層広がるものと期待されます。

２．研究手法・成果

以上の背景のもと、研究グループは今回、PCSEL の高出力・高ビーム品質な特長をそのままに、より狭い固有スペクトル線幅を実現するために、面積を 250μm から 1mm に拡大した PCSEL を新たに設計、開発しました。

上述のように、PCSEL は、従来の半導体レーザーと比較して大きな発振面積でも単一の周波数で発振可能であるため、原理的に狭い固有スペクトル線幅が期待されます。この潜在的な特長を引き出すためには、発振面積を拡大した際に、面内の共振周波数分布を均一にすることが重要となります。図 1(a)に示すように、発振領域内で一様な電流密度分布で電流を連続注入した場合、素子内部の発熱によって中央部の温度が高い分布となります[図 1(b)の理論計算結果参照]。このとき、フォトニック結晶を形成する半導体材料の屈折率が温度によって変化し、フォトニック結晶の共振周波数に面内分布が生じます。すると、発振周波数に対して、素子の中央部が光の禁制帯[注 7)]として働くようになり、図 1(c)のように、素子内部の光が中央から端部へと押しやられ、外部への光の漏れ、すなわち、面内損失[注 8)]が大きくなると予想されます。この面内損失の増大は、素子内部の光子数が減少することでスペクトル線幅の増大を招くほか、場合によっては高速自己変化現象[注 9)]を生じ、レーザー出力が瞬時的に（ピコ秒程度で）増大する短パルス発振を生じさせることも懸念されます。そこで本研究では、図 1(d)のように中央部分の電流分布を低減する工夫を行いました。この工夫により、素子内部の温

度分布は図 1(e)のように平坦な分布となると期待され、その結果、図 1(f)のように共振周波数分布も平坦となり、面内損失が大幅に抑制されることが期待されます。

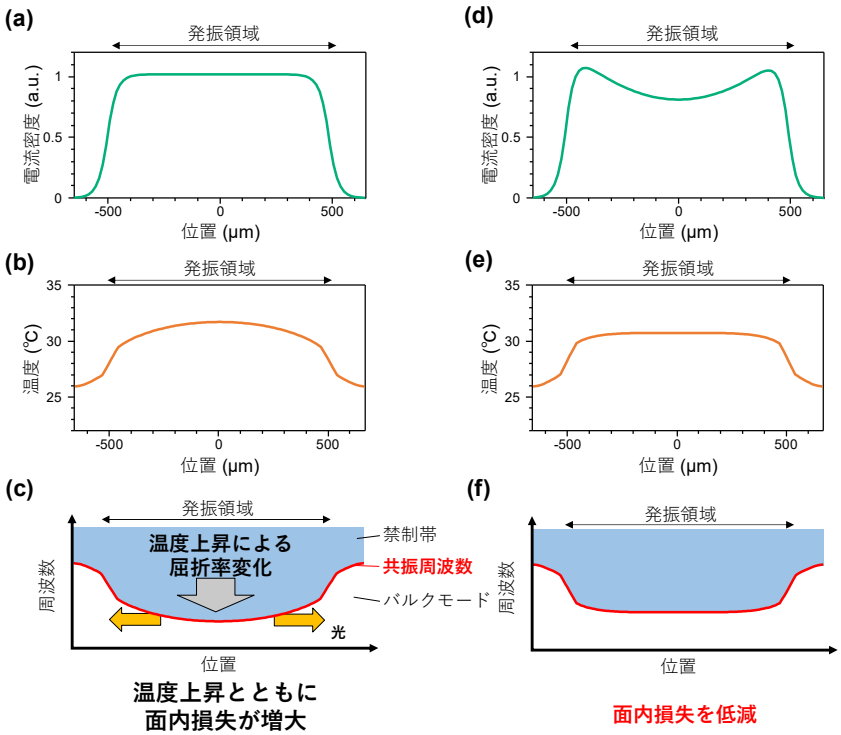


図 1. (a)(b)(c) 発振領域内で平坦な電流密度分布となるように電流を注入した場合の（a）電流密度分布、(b) 素子内部の温度分布、(c) 共振周波数分布。(d)(e)(f) 温度分布が平坦となるように電流密度分布を調整した場合の（d）電流密度分布、(e) 素子内部の温度分布、(f) 共振周波数分布。中央部分の電流密度を意図的に低減させることで、温度分布が平坦となり、その結果、面内損失を低減することが可能となりました。以上、全て理論計算結果を示しています。

さらに、上記に加えて、図 2 に示すように、フォトニック結晶構造の細かなチューニングも行いました。フォトニック結晶としては、これまで研究チームが開発してきた二重格子構造を用いています。この構造では、2 つの空孔の距離 d と大きさ x を調整することで、フォトニック結晶面内の光波の結合を制御し、面内損失および放射損失[注 10)]を独立して制御することが可能です。上で述べたように、面内損失が大きい場合は、素子内部の光子数の減少による線幅の増大や、自己変化による不安定化を招く可能性があります。その一方で、面内損失を過度に小さくすると、基本モードの他に、高次モードが発生し、線幅が増大することが懸念されるため、適切な面内損失を設定する必要があります。さらに、高出力と狭線幅の両立を実現するためには、光を上部へ効率良く取り出すことが重要で、放射損失も適切な値に設定することが求められます。今回、数値計算を用いた詳細な設計を行い、高出力動作と狭線幅動作の両立が可能なフォトニック結晶構造（図 2 に作製構造と記した白丸の構造）を見出すことに成功しました。

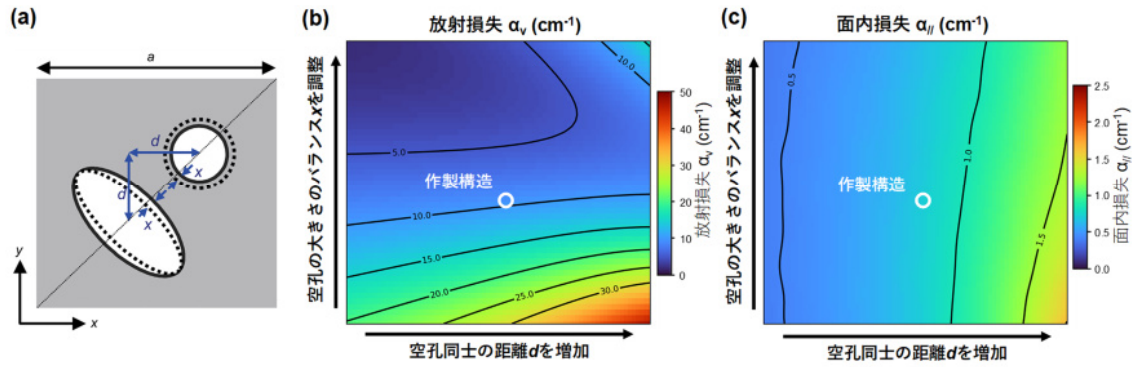


図 2.(a) 二重格子フォトニック結晶の模式図。(b)(c) 二重格子フォトニック結晶の格子点構造を調整した場合の放射損失（b）および面内損失（c)の変化。格子点内に存在する空孔同士の距離 d（図の横軸方向）を変化させると、各空孔で回折される光の位相差が変わるため、結果的に面内の回折効果が変化し、主に面内損失の調整が可能となります。一方、格子点内に存在する空孔の大きさのバランス（図の縦軸方向）を変化させると、各空孔から放射される光の強度のバランスが変化し、主に放射損失の調整が可能となります。これらの調整によって、高出力と狭線幅を両立する設計として、同図内の白丸で示した箇所を作製しました。

以上の設計を踏まえて作製した PCSEL の顕微鏡写真を図 3(a)に示します。この素子を室温連続動作させた際の電流-光出力特性を図 3(b)に示しますが、電流 8 A で 5 W という高い光出力が得られていることがわかります。併せて、発振スペクトルを図 3(c)に示しますが、発振波長 940nm において、バックグラウンドの強度に対して、72dB という極めて高い強度で、単一波長発振していることがわかります。上記のデバイスについて、スペクトル線幅を評価するために、周波数雑音スペクトル[注 11)]を測定した結果を図 3(d)に示します。低い周波数の領域（< 10^6 Hz）では、測定系の温度ゆらぎなど、ゆるやかに時間変化する雑音や電源回路由来の共振状の雑音などが見られる一方で、高い周波数の領域（> 10^6 Hz）では周波数に対して一定の強度の雑音が見られます。この一定の雑音が半導体レーザー固有のスペクトル線幅（自然放出雑音[注 2)]）であり、この強度から見積もったスペクトル線幅は測定限界の 1 kHz 程度となりました。以上より、5W 級の高出力と 1 kHz の固有狭スペクトル線幅を半導体レーザー単体で実現することに初めて成功しました。

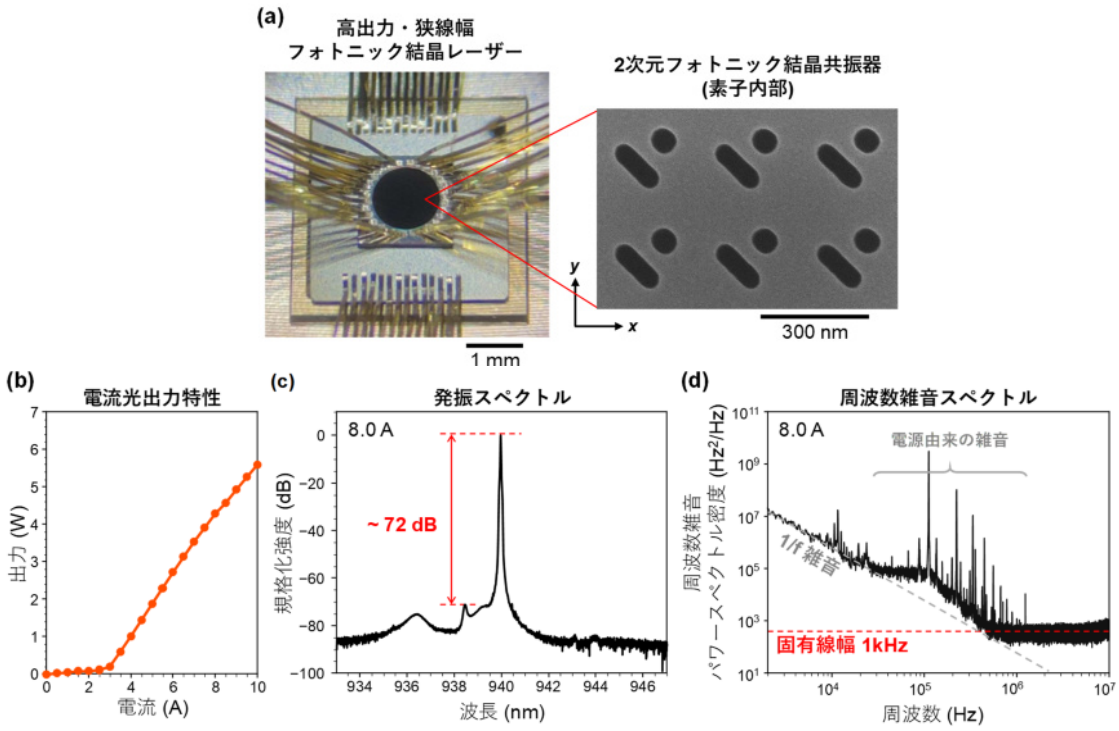


図 3. (a) 開発した高出力・狭線幅フォトニック結晶レーザーの写真と内部の 2 次元フォトニック結晶共振器の走査電子顕微鏡写真、(b) 電流光出力特性、(c) 発振スペクトル、(d) 周波数雑音スペクトル。8.0 A の直流電流注入動作にて、5 W の高出力と 1kHz の狭線幅を実現しました。

3．波及効果、今後の予定

高出力・狭線幅を両立した PCSEL は、様々な分野への波及効果が期待されます。例えば、1 で述べたように、長距離の伝搬によって非常にそのパワーが微弱となった場合でも、光の干渉効果を用いた検出が可能となるため、宇宙空間における衛星間通信、人工衛星からの地球表面観測など、宇宙応用において重要となります。さらに別の応用として、スペクトル純度の高い高出力レーザーを原子やイオンに照射すると、それらを絶対零度近くまで冷却することが可能であり、原子物理学における様々な物理現象の解明に役立つほか、量子計算機開発等への応用も期待されます。今後は、PCSEL の高出力・高ビーム品質な特長をそのままに、さらなる狭線幅（<100Hz）動作を目指すとともに、上述の様々な応用へと積極的に PCSEL を適用していく予定です。

4．研究プロジェクトについて

本研究は、主に、以下のプロジェクトのもとに推進されました。

・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別推進研究（22H04915）および基盤研究 B（20H02655）
・ 内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 研究開発と Society5.0 との橋渡しプログラム（BRIDGE）

＜用語解説＞

注 1）フォトニック結晶レーザー：光の波長（数百ナノメートル）と同程度の周期で屈折率を空間的に変化させた人工的な微細構造である「フォトニック結晶」を内部に埋め込んだ半導体レーザーのこと。フォトニック結晶内部では、光の伝搬が禁止される「禁制帯（注 7 参照）」や、2 次元的な定在波状態が生じる「バンド端」が形成される。フォトニック結晶レーザーは、後者のバンド端における 2 次元的な定在波状態をレーザー発振

に利用することで、面発光レーザーとして動作する。主な特長として、面積を拡大しても単一波長でのレーザー発振を維持することが可能であり、高出力と狭いビーム発散角を両立可能な次世代半導体レーザーとして注目されている。

注 2）自然放出光: 注入された電子と正孔が、外部光の刺激なしに、無秩序に再結合して発生する光を自然放出光と呼ぶ。これに対して、外部光の刺激により、外部光と同じ位相・偏光・方向で光を放出する現象を誘導放出と呼ぶ。レーザー発振は、誘導放出により生じるが、レーザー光と同じ周波数の自然放出光が、レーザー光に重畳し、その位相や大きさに揺らぎをもたらす。これがレーザー固有のスペクトル線幅を決定する。

注 3）プレス発表「100W～1kW 級単一モードフォトニック結晶レーザーの設計指針の確立―超スマート社会を支える究極の半導体レーザー光源の実現に向けて―」を参照。
https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20220706

注 4）プレス発表「フォトニック結晶レーザーの高輝度単一モード連続動作の実現 －スマート製造を始めとする各種分野のゲームチェンジに向けて－」を参照。
https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230615

注 5）T. Inoue, T. Kim, S. Katsuno, R. Morita, M. Yoshida, M. D. Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, “Measurement and numerical analysis of intrinsic spectral linewidths of photonic-crystal surface-emitting lasers.” Appl. Phys. Lett. 122, 051101 (2023)を参照。
https://doi.org/10.1063/5.0135042

注 6）プレス発表「世界初、「フォトニック結晶レーザー」で 低軌道-静止軌道衛星間向け光通信方式の実証に成功 －6G 時代における宇宙空間の安定で大容量な通信の実現に貢献－」を参照。
https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20231019-1

注 7）禁制帯：フォトニック結晶内部において、光の伝搬が禁止された周波数帯域のこと。禁制帯の帯域内の周波数の光をフォトニック結晶に入射すると、光は強く反射される。

注 8）面内損失：2 次元フォトニック結晶に存在する光が、電流が注入されていない共振領域外に広がることで、吸収や散乱を受けて生じる損失。この損失は光出力には寄与せず、エネルギーの損失となるほか、素子の内部に存在する光子の数を減らしてしまうため、線幅の増大にも繋がる。

注 9）自己変化現象：電流によって注入されたキャリア（電子・正孔対）が光子に変換される際の屈折率変化によって、面内の共振周波数分布が高速変化する現象のこと。プレス発表「高速自己変化可能なフォトニック結晶による高ピーク出力・短パルス光の発生ー超スマート社会を支える高精度光センシングやレーザー微細加工応用に向けてー」を参照：https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230127

注 10）放射損失：2 次元フォトニック結晶に存在する光が垂直方向に放射されことで生じる損失。この損失はフォトニック結晶レーザーにとって光出力となるため、高出力を実現するためには、適切な値に設定する必要がある。

注 11）周波数雑音スペクトル：レーザー光に含まれる周波数成分の時間変動をその変化の速さ（周波数）で分解した指標。変動の大きさは、分解した帯域で規格化されたパワースペクトル密度で表され、その値が小さいほどレーザー光の周波数が安定していることを示す。

＜研究者のコメント＞

長年の半導体レーザーの課題でもあった高出力と狭線幅の両立をフォトニック結晶レーザーにおいて実現できたことは、学術的に重要な成果であるとともに、フォトニック結晶レーザーが従来の半導体レーザーだけ

でなく、多種多様なレーザー光源を置き換える究極的なものであることを示す、産業的にも極めて重要な成果であると考えています。今後は、さらなる高出力・狭線幅な出力を実現できるようなフォトニック結晶レーザーの開発に取り組んでいきたいと考えております。（野田）

＜論文タイトルと著者＞

タイトル：Demonstration of high-power photonic-crystal surface-emitting lasers with 1-kHz-class intrinsic linewidths（和訳：1kHz 級固有線幅高出力フォトニック結晶レーザーの実現）

著　　者：Ryohei Morita, Takuya Inoue, Masahiro Yoshida, Kentaro Enoki, Menaka De Zoysa, Kenji Ishizaki, Susumu Noda

掲 載 誌：*Optica*　　DOI：10.1364/OPTICA.505406